

**ФЕЙЗУЛЛАЕВ А.А.** (Институт геологии и геофизики Национальной Академии Наук Азербайджана, Баку, Азербайджан)

**ГОДЖАЕВ А.Г.** (Управление эксплуатации газовых хранилищ ПО «Азнефть» Государственной Нефтяной Компании Азербайджана, Баку, Азербайджан)

## ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЕРВУАРА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА (НА ПРИМЕРЕ ПЛОЩАДИ ГАРАДАГ, АЗЕРБАЙДЖАН)

В статье на примере месторождения подземного хранилища газа (ПХГ) Гарадаг в Южно-Каспийском бассейне (ЮКБ) с учетом мировых достижений дан анализ результатов изучения проблемы деформационных изменений пород, связанных с разработкой нефтегазовых месторождений и эксплуатацией ПХГ. На основании повторных геофизических исследований скважин установлено, что за относительно короткий срок наблюдений (от 8 мес до 2,5 лет) разработка VII горизонта продуктивной толщи (нижний плиоцен) газоконденсатного месторождения Гарадаг Южно-Каспийского бассейна привела к снижению проницаемости пород в пределах от 1,2 до 4,9 мД при падении давления от 2,4 до 11,7 МПа. Величина относительного снижения проницаемости изменяется от 41 до 56 %, более высокие значения которой характерны для высокопористых пород. Показано, что многократные циклы изменения нагрузок на пласт в процессе эксплуатации ПХГ также способствуют развитию в породе деформационных изменений, которые приводят к разрушению скелета породы. Очевидным доказательством объективности этого процесса является оседание в сепараторе и резервуаре для жидкости на ПХГ Гарадаг в конце каждого сезона примерно 25–30 т песка, являющегося продуктом разрушения пород подземного резервуара. Это приводит к необратимым изменениям фильтрационно-емкостных свойств пород резервуара, которые более контрастно отражаются на изменении проницаемости пород. Деформационные изменения в пласте, вызванные эксплуатацией месторождения и ПХГ, приводят к снижению продуктивности и приемистости скважин.

**Ключевые слова:** месторождение, подземное хранилище газа, пластовое давление, порода, деформация, пористость, проницаемость, Гарадаг

### Введение

Как известно, длительная разработка месторождений углеводородов приводит к нарушению равновесных условий в недрах и может вызывать значительные изменения напряженно-деформированного состояния, как пластов-коллекторов, так и вышележащих пород-покрышек. Так, многочисленными теоретическими, экспериментальными и промысловыми исследованиями [1–9] установлено, что существенное падение пластового давления в результате извлечения из подземного резервуара значительных объемов флюидов (нефти, газа, воды) приводит к необратимым деформационным изменениям в породе и ухудшению их фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС). Как следствие, наблюдается снижение продуктивности скважин и формирование в пласте значительных неизвлекаемых остаточных запасов углеводородов [10, 11].

Наряду с этим, в связи с необходимостью решения проблемы большой сезонной разницы между спросом и предложением природного газа в 1916 г. в истощенном газовом месторождении Зоар (район г. Буффало в США) было создано первое промышленное подземное хранилище газа (ПХГ). В настоящее время в мире уже действует 688 ПХГ общей активной ёмкостью более 377 млрд м<sup>3</sup>. Кроме того, планируются или создаются еще 236 ПХГ [12–15].

Одной из главных особенностей эксплуатации ПХГ являются многократные знакопеременные нагрузки на пласт, связанные с сезонной закачкой и отбором газа, сопровождающихся максимальным снижением эффективного давления в конце закачки газа в пласт летом и резким повышением – в период отбора газа из пласта зимой.

Как показывают исследования многих авторов, такие многократные циклические изменения напряженного состояния вызывают деформационные процессы в пласте и особенно в околоскважинных зонах, сопровождающиеся изменением структуры порового пространства и ФЕС пород, а также возникновением нарушений в колоннах скважин. Все это может способствовать снижению приемистости скважин, техническим потерям газа, ошибкам в расчете активного и буферного объемов газа.

В связи с этим целью данной статьи являются обобщение и анализ результатов изучения данной проблемы, основанные как на мировом опыте, так и на результатах исследований на месторождении/ПХГ Гарадаг в Южно-Каспийском бассейне (ЮКБ).

#### Кратко о месторождении/ПХГ Гарадаг

Месторождение Гарадаг, расположенное в юго-западной части Апшеронского полуострова (рис. 1), являлось первым, наиболее характерным газоконденсатным месторождением бывшего СССР.

Разработка газоконденсатной залежи VII-VIIa горизонтов ПТ в режиме истощения началась с 1955 г. Нефтяная оторочка залежи была вскрыта и введена в промышленную разработку на 3,5 года позже. Дебит

скважины-первоткрывательницы № 204 (интервал 4006–4047 м) через 10 мм штуцер составил 100 т/сут с газовым фактором 200 м<sup>3</sup>/т. Максимальный уровень добычи нефти и газа был достигнут в 1958 г.

К концу 1980-х годов залежи в VII-VIIa горизонтах были истощены. За период с 1955 по 1978 г. из VII-VIIa горизонтов было отобрано более 20,5 млрд м<sup>3</sup> газа. При этом, как было отмечено выше, значительные запасы углеводородов остались в пласте.

По оценке М.Д. Каргер и др. [16], при разработке газоконденсатной залежи в режиме истощения извлекается 30–50 % от начальных запасов конденсата, содержащихся при начальных пластовых условиях в извлеченном газе.

В настоящее время газоконденсатные залежи месторождения Карадаг, имеющего блочное строение, представляют собой сложную трехфазную газогидродинамическую систему, где по состоянию на 01.01.1976 г. в порах пласта осталось:

- около 2 млрд м<sup>3</sup> неизвлекаемых запасов газа;
- порядка 2 млн т жидкого конденсата, выпавшего в результате ретроградных процессов;
- порядка 8 млн т остаточных запасов нефти.

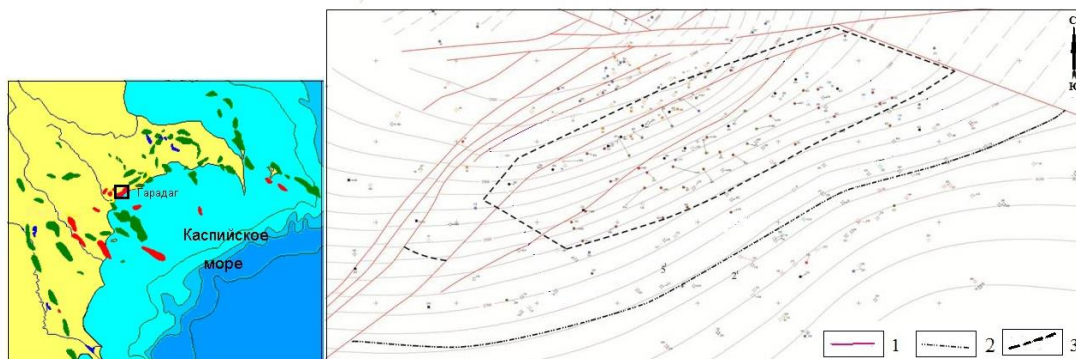


Рис. 1. Схема расположения месторождений / ПХГ Гарадаг, Азербайджан (красным обозначены газовые/газоконденсатные, зеленым – нефтяные месторождения) и структурная карта по кровле VIIa горизонта месторождения Гарадаг (1–нарушения; 2–первоначальные контуры газоконденсатной залежи; 3– контуры ПХГ)

Начало эксплуатации ПХГ Карадаг (в VII-VIIa горизонтах) относится к 1986 г. Площадь газоносности VIIa горизонта в начале разработки была наибольшей. Однако в период передачи этого горизонта для использования в качестве объекта ПХГ большая часть ее была обводнена и в настоящее время только небольшая ее часть используется для закачки и отбора газа.

Два года после введения ПХГ в эксплуатацию оно работало в режиме закачки, после чего было переведено в циклический режим «закачка/отбор», с постепенным наращиванием давлений и объема закачиваемого газа. С 2005 г., после передачи ПХГ в ведение ПО Азнефть, работа ПХГ контролируется на регулярной и систематической основе.

В настоящее время основной объем закачиваемого газа поступает практически в часть (от трети до половины) первоначального объема резервуара в VII+VIIa горизонтах [16].

#### Результаты исследований и их обсуждение

*Изменение ФЕС пород в связи с разработкой месторождения*

Начальное пластовое давление в газоконденсатной залежи VII горизонта ПТ месторождения Гарадаг как в первом, так и во втором блоках составляло 377,5 атм (38,2 МПа). В процессе разработки залежи к 1976 г. пластовое давление в I блоке снизилось до 43,6 атм (4,4 МПа), а во II блоке – до 38,7 атм (3,9 МПа).

Динамика изменения во времени пластовых давлений в этих блоках показана на рис. 2.

Как видно из графика, приведенного на рис. 2, разработка газоконденсатной залежи в VII горизонте ПТ месторождения Гарадаг без поддержания пластового давления привела к падению давления в резервуаре почти на 80 % от первоначального уже в течении первых 6–7 лет. Диапазон снижения давления составляет около 34 МПа.

В процессе разработки залежи на истощение отмечено также снижение на 6–8 °С и пластовой температуры.

Установлено, что наибольшее падение давления в месторождении Гарадаг характерно для пород с более благоприятными коллекторскими свойствами (низким содержанием глинистой фракции и низкой карбонатностью) [9, 17].

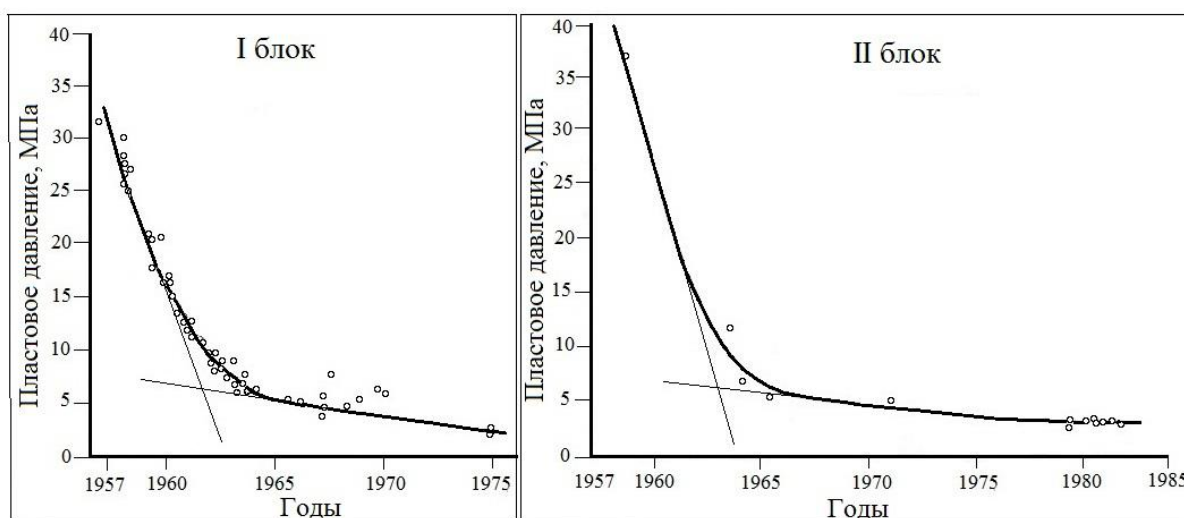


Рис. 2. Динамика изменения во времени пластовых давлений в VII горизонте ПТ (I и II блоки) месторождения Гарадаг, связанная с его разработкой в режиме истощения



Многие исследователи указывают на снижение ФЕС пород в процессе разработки, связанное с падением пластового давления. Так, например, по данным А. Kharroubi и др. [18], снижение пластового давления (при постоянстве всестороннего давления) с 110 до 10 МПа отразилось на уменьшении проницаемости образцов породы до 50 %. Моделированием длительного снижения пластового давления в залежи до 10–11 МПа установлено уменьшение проницаемости до 60 %, которое прекращается при росте эффективного давления на 2–3 МПа [6].

По оценкам А.W. Chan [4], неэластичная деформация пород, связанная с добычей углеводородов на месторождениях в Мексиканском заливе, может привести к уменьшению пористости пород от 30,8 до 29,4 %. Причем уменьшение проницаемости пород более существенно (до 25–50 % от начального значения) в сравнении, с уменьшением пористости (до 15 %).

На более существенные необратимые изменения проницаемости, в сравнении с пористостью, указывают и многие другие авторы [19, 20]. По данным О.Ю. Кашникова [6], изменение проницаемости может достигать 60 %, в сравнении с пористостью (до 2 %). По экспериментальным данным А.W. Chan [4], уменьшение пористости породы на 10 % сопровождается уменьшением проницаемости примерно на 70 % от первоначального значения, а по более поздней оценке [21], уменьшение пористости пород от 23 до 21 % сопровождается уменьшением проницаемости от 230 до 50–140 мД. По данным же J.-J. Liu и др. [22], снижение пластового давления и соответственно увеличение эффективного давления на 20 МПа приводит к относительному уменьшению пористости и проницаемости, соответственно на 13 и 80 % для тре-

щиноватых пород, и 2 и 60 % для гранулярных коллекторов.

Следствием ухудшения ФЕС в процессе разработки месторождения является снижение продуктивности скважин и формирование в пласте значительных объемов остаточных неизвлекаемых углеводородов. Так, по данным M.N.J. Al-Awad [10], деформационное изменение проницаемости при падении пластового давления приводит к уменьшению продуктивности песчаника до 33 %, в сравнении с продуктивностью с неизменной проницаемостью, доля остаточной нефти за счет неупругой деформации пород может достигать 20–30 % [11].

На рис. 3 показаны результаты оценки изменения проницаемости пород в связи с падением пластового давления в VII горизонте ПТ месторождения Гарадаг, основанные на данных повторных геофизических исследований скважин. Как видно из этих графических построений, во всех случаях за относительно короткий период (от 8 мес до 2,5 лет) отмечается снижение проницаемости в пределах от 1,2 до 4,9 мД при падении давления от 2,4 до 11,7 МПа. В среднем уменьшение проницаемости на 1 мД происходит при снижении давления от 2,2 до 7,3 МПа.

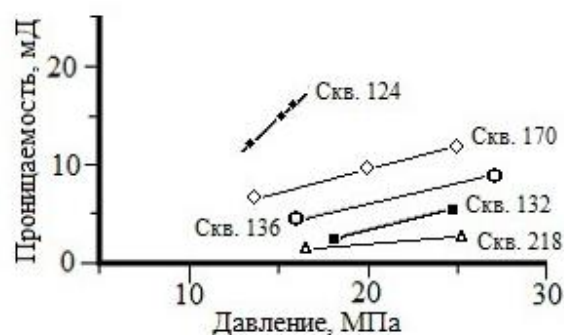


Рис. 3. Динамика изменения проницаемости пород в различных скважинах, разрабатывающих VII горизонт ПТ месторождения Гарадаг, связанная с падением пластового давления

Как видно из данных табл. 1, при примерно равной продолжительности наблюдения в трех скважинах (170, 218, 132) относительная величина уменьшения проницаемости составляет соответственно 41, 44 и 56 %, что хорошо согласуется с результатами других исследователей [4, 6, 22]. Кроме того, можно отметить большее относительное снижение проницаемости в высокопористых породах.

*Изменение ФЕС пород в связи с эксплуатацией ПХГ*

Важно отметить существование характерных отличий условий изменения ФЕС пород в процессе эксплуатации месторождения и ПХГ. В первом случае в результате интенсивного отбора флюидов из резервуара, сопровождающегося существенным однонаправленным падением пластового давления и повышением эффективного давления, происходит нарушение структуры порового пространства, сформировавшегося в течение геологического времени. Это приводит в итоге к дополнительному уплотнению породы, которое в значительной степени носит необратимый характер.

Фактические породы истощенного нефтегазоносного пласта, используемого для подземного хранения газа, изначально

являются деформационно-измененными. Другой важной отличительной особенностью эксплуатации ПХГ являются циклические разнонаправленные нагрузки на пласт, связанные с сезонными закачками и отбором газа.

Хотя диапазон вариаций пластовых давлений значительно меньше диапазона падения пластового давления при разработке месторождения в режиме истощения, многие исследователи указывают на развитие значительных деформаций в породе в процессе эксплуатации ПХГ. К главному фактору при этом относят многократность циклических воздействий на пласт.

Так, например, с начала эксплуатации ПХГ Гарадаг было осуществлено около 60 циклических закачек-отборов газа. На рис. 4 показано изменение пластового давления в конце закачек (пределы колебания давления 6,9–19,3 МПа) и отборов (пределы колебания давления 6,0–10,8 МПа) газа на ПХГ Гарадаг. Разница значений этих параметров составляет 0,8–10,6 МПа, а в среднем 3,4 МПа, что более чем в 9 раз меньше, чем падение давления в результате разработки этого же объекта (31,8 МПа).

Таблица 1

Изменение проницаемости пород в VII горизонте ПТ месторождения Гарадаг в связи с падением давления

Скважина	Пористость, %	Динамика параметров		
		Время между замерами, мес.	Величина падения давления, МПа	Относительная величина снижения проницаемости, %
132	18,5	15	3	56
136	18,0	25	11	47
218	17,4	14	1	44
170	16,7	13	5	41

Экспериментально установлено, что прочность породы при динамической пульсирующей нагрузке снижается на 40–50 %. В результате уже после небольшого числа циклов переменных нагрузок в породе появляются микротрещины, приводящие к разрушению скелета породы и интенсивному выносу песка в период отбора газа из ПХГ [23–26]. Так, по наблюдениям Евик В.Н. и др. [27], за 34 цикла закачки и отбора газа из Щелковского ПХГ не было отмечено ни одной скважины, которая не выносила бы твердую фазу, являющуюся продуктом разрушения коллектора.

В связи с этим важно отметить, что в конце каждого сезона в сепараторе и резервуаре для жидкости на ПХГ Гарадаг оседает примерно 25–30 т песка, что является очевидным показателем разрушения пород подземного резервуара, приводящего к необратимым изменениям ФЕС горных пород.

Существует мнение, что одной из возможных причин разрушения скелета продуктивного коллектора ПХГ являются неконтролируемые потери или уходы буферного газа в процессе циклических

закачек и отборов, которые приводят к увеличению амплитуды колебаний пластового давления. Для уменьшения депрессии и предотвращения выноса песка из скважин рекомендуется сокращать объем активного или увеличивать объем буферного газа, т.е. уменьшать отношение объемов активного и буферного газа [24, 28].

Установлено, что деформационные процессы более контрастно отражаются на изменении проницаемости пород [23].

В частности, это подтверждают результаты экспериментального изучения влияния циклических знакопеременных нагрузок на проницаемость образцов терригенных пород 1-го гдовского пласта Невского ПХГ, сложенных низкоглинистыми (менее 2 %) кварцевыми песчаниками и алевролитами [29, 30]. Установлено, что 10-кратные знакопеременные циклы изменений пластового давления (с разницей до 8 МПа) вызывают снижение (с ростом числа циклов) проницаемости до 3–4 %. При этом более высокие значения абсолютного снижения проницаемости выявлены для высокопроницаемых коллекторов [6, 30].

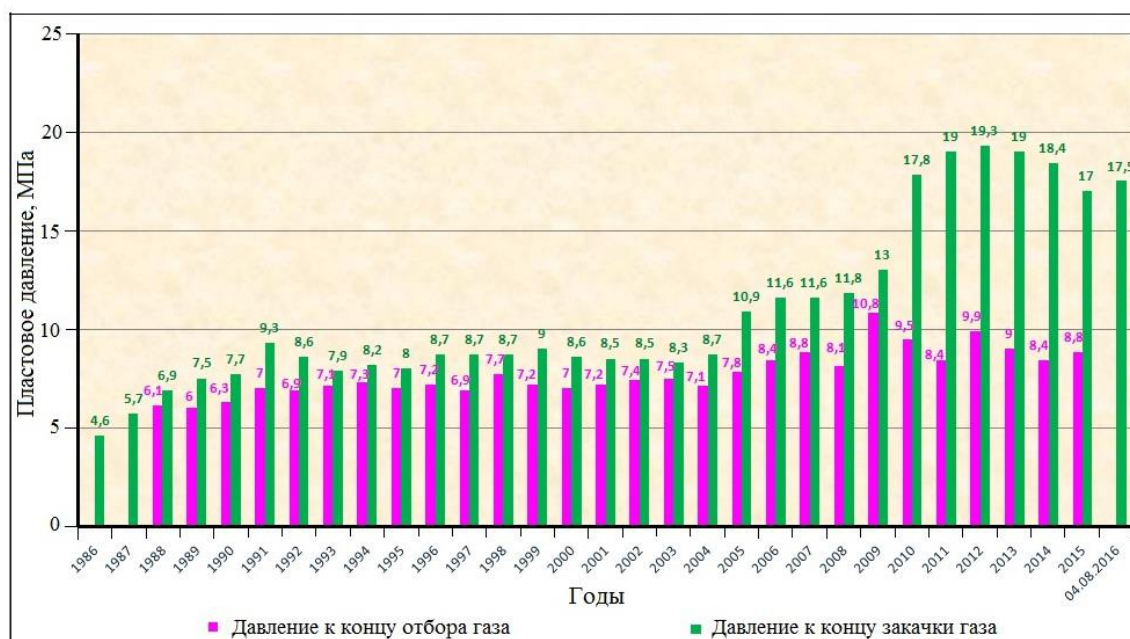


Рис. 4. Динамика изменения пластовых давлений в конце закачки и отбора газа на ПХГ Гарадаг, Азербайджан

Что касается изменения пористости, то согласно экспериментам Г.А. Голодковской и И.В. Калининченко [31] на образцах искусственного песчаника с первоначальной пористостью 30–40 % рост эффективной нагрузки от 0 до 12,0 МПа при 7–10-кратном изменении пластового давления приводит к уменьшению пористости на 3–4 %.

Весьма интересны также результаты экспериментов на установке высокого давления и температуры АСИФ-1, разработанной в Институте Проблем Глубинных Нефтегазовых Месторождений (ныне Институт нефти и газа) НАН Азербайджана, которые проводились на образцах пород ПТ ЮКБ [32]. В этом эксперименте первоначально достигались значения эффективного давления, соответствующие горному и пластовому давлению на естественной глубине залегания отобранного образца породы. Затем после однократного или двукратного снижения и повышения порового давле-

ния до первоначального значения были построены гистерезисные кривые с целью оценки необратимых изменений коэффициентов пористости и проницаемости. В результате было установлено, что:

- при снижении, а затем восстановлении давления во всех случаях наблюдаются остаточные (необратимые) деформации (табл. 2), и первоначальные пористость и проницаемость пород не восстанавливаются;

- при прочих равных условиях величина остаточных деформаций зависит от гранулометрического состава пород. С ростом содержания в образцах пород глинистой фракции значение необратимой деформации (при снижении и восстановлении пластового давления на одну и ту же величину) увеличивается.

Негативным следствием изменения ФЕС, вызванных циклическими знакопеременными нагрузками на пласт, является снижение продуктивности и приемистости скважин [6, 33–35].

Таблица 2

Необратимые остаточные деформации пород-коллекторов ПТ месторождений ЮКБ

Петрофизические параметры	$P_{пл}$ начальное, МПа	$P_{пл}$ конечное, МПа	Необратимые остаточные деформации, %
Проницаемость	65	24	19–38
Пористость	53	24	1,1–5,6

### Заключение

Разработка газоконденсатной залежи в VII горизонте ПТ месторождения Гарадаг без поддержания пластового давления привела к падению давления в резервуаре почти на 80 % от первоначального уже в течение первых 6–7 лет. Диапазон снижения давления составил около 34 МПа. Как показывают данные повторных геофизических исследований скважин, такое существенное падение пластового давления и соответственно повышение эффективного давления при-

водят к изменению ФЕС пород. Так, установлено, что за относительно короткий срок наблюдений (от 8 мес до 2,5 лет) наблюдается снижение проницаемости пород в пределах от 1,2 до 4,9 мД при падении давления от 2,4 до 11,7 МПа. При примерно равной продолжительности наблюдения (13–15 мес.) в трех скважинах (170, 218, 132) относительная величина уменьшения проницаемости составляет соответственно 41, 44 и 56 %, что хорошо согласуется с результатами исследований других ученых и





специалистов. При этом отмечено большее относительное снижение проницаемости в высокопористых породах.

Показано, что многократные циклы изменения нагрузок на пласт в процессе эксплуатации ПХГ также способствуют развитию в породе деформационных изменений, образованию микротрещин, которые в конечном итоге приводят к разрушению скелета породы. Очевидным доказательством объективности этого процесса является оседание в сепараторе и резервуаре для жидкости на ПХГ Гарадаг в конце каждого сезона примерно 25–30 т песка, являющегося продуктом разрушения пород подземного резервуара. Это приводит к необратимым изменениям ФЕС пород резервуара, которые более контрастно отражаются на изменении проницаемости пород.

Деформационные изменения в породе резервуара, вызванные как однонаправленным падением пластового давления в процессе разработки нефтегазового месторождения, так и циклическими знакопеременными нагрузками на пласт при эксплуатации ПХГ, приводят к снижению продуктивности и приемистости скважин.

Мониторинг этих процессов и их учет имеют важное значение для определения оптимального режима эксплуатации месторождений и ПХГ, повышения достоверности подсчета запасов углеводородов.

#### Библиографический список

1. Абасов М.Т., Джеваншир Р.Д., Иманов А.А., Джалалов Г.И. О влиянии пластового давления на изменение фильтрационно-емкостных свойств терригенных пород-коллекторов в процессе разработки месторождений нефти и газа // Геология нефти и газа, 1997. – № 5. – С. 34–39.
2. Mohiuddin M.A., Korvin G., Abdurraheem A., Awal M.R., Khan K., Khan M.S. and Hassan H.M. Stress-dependent porosity and permeability of a suite of samples from Saudi Arabian sandstone and limestone reservoirs. [SCA2033. Symposium of Core Analysts.] Abu Dhabi. UAE, 2000, pp. 1–14.
3. Ferronato, M., G. Gambolati, P. Teatini, and D. Baù. Unloading-reloading uniaxial compressibility of deep reservoirs by marker measurements. In Proc. 11th Int. Symp. on Deformation Measurements, eds S.C. Stiros and S. Pytharoulis, Patras University Publ., 2003, pp. 341–346.
4. Chan A.W. Production-induced reservoir compaction, permeability loss and land surface subsidence. Dissertation for PhD degree. Stanford University, 2004. – 176 p.
5. Gumrah F., Izgec Ö., Gokcesu U. and Bagci S. Modeling of Underground Gas Storage in a Depleted Gas Field, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2005, №27(10). – pp. 913–920.
6. Кашников О.Ю. Исследование и учет деформационных процессов при разработке залежей нефти в терригенных коллекторах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2008. – 23 с.
7. Рамазанов Р.А. Изучение и прогнозирование изменения коллекторских свойств горных пород в процессе разработки по комплексу ГИС и керновых исследований. Дис. ... докт. филос. наук. – Баку: Фонд Института Геологии, 2010. – 200 с.
8. Rock engineering problems related to underground hydrocarbon storage. Lu, Ming. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, №2(4). – pp. 289–297.
9. Фейзуллаев А.А., Велиева Э.Б., Рамазанов Р.А., Исмаилова Г.Г. Об изменении петрофизических свойств пород в связи с падением давления в длительно разрабатываемых нефтегазовых месторождениях // Новости геофизики в Азербайджане. – 2013. – №3. – С. 3–14.
10. Al-Awad M.N.J. Relationship Between reservoir productivity and pore pressure drop. Journal of King Saud University. Engineering Sciences, 2001, №13(1). – pp. 137–152.
11. Черемисин Н.А., Сонич В.П., Ефимов П.А. Роль неупругой деформации коллекторов в нефтеотдаче пластов. // Нефтяное Хозяйство. – 2001. – № 9. – С. 76–79.
12. Katz D.L. and Tek M.R. Overview on underground storage of natural gas. Journal of Petroleum Technology, 1981, № 33. – pp. 943–951.
13. Bary, A., Crotagino, F., Prevedel B., Berger H., Brown K., Frantz J., & Ren N. Storing natural gas underground. Oilfield Review, 2002, №14(2). – pp. 2–17.
14. Evans, D.J. An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the de-





- velopment of risk assessment methodology. British Geological Survey Internal Report. 2007.
15. Underground gas storage in the world - 2013. EXECUTIVE SUMMARY. <http://www.enerdata.net/>.
16. Каргер М.Д., Fidens S.A., Берман Л.Б., Нейман В.С., Трофимов Д.М., Захаров А.И., Вольпин С.Г. Окончательный отчет по Проекту [Построение блочной фильтрационной модели подземного газохранилища Карадаг и рекомендации по системе закачки и отбора газа]. – Баку, 2013. – 103 с.
17. Фейзуллаев А.А., Велиева Э.Б., Гасанов А.З. Особенности изменения пластовых давлений в длительно-разрабатываемых месторождениях Апшеронского полуострова (на примере месторождения Гала) // Известия НАНА: Науки о Земле. – 2012. – № 4. – С. 3-12.
18. Kharroubi A., Layan B., Cordelier P. Influence of pore pressure decline on the permeability of North Sea sandstones. [International Symposium of the Society of Core Analysts], Abu Dhabi. UAE, 2004, 5-9 October.
19. Peng S., Z. Meng, H. Wang, C. Ma, and J. Pan. Testing study on pore ratio and permeability of sandstone under different confining pressures. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, №22(5). – pp. 742–746.
20. Huang Y. and E. Wang. Experimental study of the laws between the effective confining pressure and rock permeability, Journal of Tsinghua University, 2007, 47(3), 340–343.
21. Chan A.W. and Zoback M.D. The Role of Hydrocarbon Production on Land Subsidence and Fault Reactivation in the Louisiana Coastal Zone. Journal of Coastal Research, 2007, №23(3). – pp. 771-786.
22. Liu, J.-J., Feng, X.-T, Jing, L.-R. Theoretical and experimental studies on the fluid-solid coupling processes for oil recovery from low permeability fractured reservoirs. Int. J Rock Mech. Min. 2004, Sci, 41(3).
23. Кольчицкая Т.Н., Михайлов Н.Н. Поведение глинистых пород при циклических нагрузках // Геология нефти и газа.–2000.– №2.– С.52-55.
24. Яковлева Н.В. Совершенствование методов мониторинга параметров подземных хранилищ газа с целью предотвращения осложнений при эксплуатации. Авт. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2005.
25. Калиниченко И.В. Экспериментальное моделирование изменения деформационных и емкостных свойств пористых коллекторов в связи с эксплуатацией подземных хранилищ газа. Авт. дис. ... канд. геол.-мин. наук: Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. М., 2009. – 208 с.
26. Зубарев С.А. Развитие технологий мониторинга за объектом подземного хранения газа (На примере Центрального ПХГ). Авт. дис. ... канд. техн. наук. – Ухта, 2010.
27. Евик В.Н. Варягов С.А., Павлюкова И.В., Смирнов Ю.Ю. Мониторинг геологической среды при эксплуатации Щелковского подземного хранилища газа. <https://neftegaz.ru/science/view/393-Monitoring-geologicheskoy-sredy-pri-ekspluatatsii-Schelkovskogo-podzemnogo-hranilischa-gaza>.
28. Яковлева Н.В., Лурье М.В., Дидковская А.С. Увеличение доли буферного газа в ПХГ как эффективное средство предотвращения разрушения порового коллектора // Управление качеством в нефтегазовом комплексе, 2004. – №3/4. – С.65-67.
29. Семенов Е.О., Рыжов А.Е., Жуков В.С., Иселидзе О.В. Изменение проницаемости коллекторов при циклических изменениях эффективного давления. // Материалы II международной конференции «ПХГ: надежность и эффективность» - М.: ВНИИГАЗ, 2008. – С. 76-77.
30. Семенов Е.О. Особенности формирования и оценка коллекторских и экранирующих свойств терригенных пород при создании подземных хранилищ газа в водоносных пластах. Авт. дис.... канд. геол.-мин. наук. М., 2010.
31. Голодковская Г.А., Калиниченко И.В. Изменение пористости песчаных пород-коллекторов в связи с циклической эксплуатацией подземных хранилищ газа (ПХГ). // Материалы VIII Международной конференции «Новые идеи в науках о земле» (10-13 апреля 2007г., РГГРУ): Доклады. Т. 8. – М.: РГГРУ, 2007. – С. 115-118.
32. Иманов А.А. Физико-механические свойства осадочных пород Южно-Каспийского бассейна в глубинных условиях: углеводородные ресурсы больших глубин. – Баку: Nafta-Press, 2012.–203 с.
33. Лебедев М.С. Совершенствование методики оценки емкостно-фильтрационных свойств коллекторов подземных хранилищ газа: на примере Северо-Ставропольского подземного хранилища газа. Авт. дис. ... канд. геол.-мин. наук. – Ставрополь, 2006.
34. Жуков В.С. Воздействие современных геодинамических процессов на фильтрационно-емкостные свойства коллекторов ПХГ // Международная конференция «Современная геодинамика недр и эколого-

промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса». – М.: ИПНГ РАН, 7–9 декабря 2009.

35. Григорьев Б.В., Шубин А.А. Влияние изменения эффективного давления на фильтра-

ционно-емкостные свойства пород-коллекторов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2015. – Т. 1. – № 2(2). – С.15-21.

**“Gornye nauki i tehnologii”/ “Mining science and technology”, 2018, No. 1, pp. 3-12**

<b>Title:</b>	<b>CHANGING RESERVOIR PARAMETERS DURING EXPLOITATION OF FIELDS/UNDERGROUND GAS STORAGE (THROUGH THE EXAMPLE OF GARADAG AREA, AZERBAIJAN)</b>
<b>Author 1:</b>	Name & Surname: <b>Akper A. Feyzullayev</b> Company: <b>Institute of Geology and Geophysics of the Azerbaijan National Academy of Sciences (ANAS)</b> Address: <b>119, H. Cavid ave., Baku, Azerbaijan, AZ1143</b> Scientific Degree: <b>Dr. of Sci. (Geol.-Min.)</b> Contacts: <b>fakper@gmail.com</b>
<b>Author 2:</b>	Name & Surname: <b>A.H. Qocayev</b> Company: <b>Management of operation of gas storages of State Oil Company of Azerbaijan Republic (SOCAR)</b> Address: <b>105, A. Neimatullah, Baku, Azerbaijan, AZ1033</b> Scientific Degree: <b>PhD (Geol. Min.)</b> Contacts: <b>araz.qocayev@socar.az</b>
<b>DOI:</b>	<b>10.17073/2500-0632-2018-1-3-12</b>
<b>Abstract:</b>	The paper presents the findings of studying deformational changes in rocks connected with development of oil and gas fields and operation of underground gas storages (UGS) through the example of Garadag field/UGS in the South Caspian Basin (SCB). On the basis of repeated well-logging measurements, it was found that over relatively short monitoring period (from 8 months to 2.5 years), development of VII level of the productive stratum (Lower Pliocene) of Garadag gas condensate field in the South Caspian Basin led to decreasing permeability of rocks in the range from 1.2 to 4.9 mD, with pressure drop from 2.4 to 11.7 MPa. The relative decrease in permeability ranges from 41 to 56%, while the higher values are typical for highly porous rocks. It is shown that multiple cycles of changing loads on the stratum in the process of the field/UGS development also contribute to the development of deformational changes in the rock, which lead to disruption of the rock matrix. This conclusion is supported by precipitation of about 25 - 30 tons of sand in the separator and liquid tank at the Garadag UGS facility in the end of each season. The sand is a product of rupturing rocks of the underground reservoir. This leads to irreversible changes in permeability and porosity of the reservoir rocks, which are sharper reflected in the change in the rock permeability. Deformational changes in the stratum caused by exploitation of the field and UGS lead to decreasing well productivity and injectivity.
<b>Keywords:</b>	field, underground gas storage, reservoir pressure, rock, deformation, porosity, permeability, Garadag.
<b>References:</b>	1. Abasov M.T., Dzhevanshir R.D., Imanov A.A., Dzhalalov G.I. O vlijanii plastovogo davleniya na izmenenie fil'tracionno-emkostnykh svoystv terrigennykh porod-kollektorov v processe razrabotki mestorozhdenij nefti i gaza. [On the influence of reservoir pressure on the change in properties of terrigenous reservoir rocks in the process of development of oil and gas fields]. Geologiya nefti i gaz, Oil and gas geology, 1997, no. 5, pp.34-39. 2. Mohiuddin M.A., Korvin G., Abdurraheem A., Awal M.R., Khan K., Khan M.S. and Hassan H.M. Stress-dependent porosity and permeability of a suite of samples from Saudi Arabian sandstone and limestone reservoirs. [SCA2033. Symposium of Core Analysts.] Abu Dhabi. UAE, 2000, pp. 1-14. 3. Ferronato, M., G. Gambolati, P. Teatini, and D. Baù. Unloading-reloading



- uniaxial compressibility of deep reservoirs by marker measurements*. In Proc. 11th Int. Symp. on Deformation Measurements, eds S.C. Stiros and S. Pytharouli, Patras University Publ., 2003, pp. 341–346.
4. Chan A.W. *Production-induced reservoir compaction, permeability loss and land surface subsidence*. Dissertation for PhD degree. Stanford University, 2004, 176 p.
  5. Gumrah F., Izgec Ö., Gokcesu U. and Bagci S. *Modeling of Underground Gas Storage in a Depleted Gas Field, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2005, no. 27(10). 6 pp. 913-920.
  6. Kashnikov O.Ju. *Issledovanie i uchet deformatsionnykh processov pri razrabotke zalezhey nefti v terrigennykh kollektorah*. [Investigation and accounting of deformation processes in the development of oil deposits in terrigenous reservoirs]. Avtoref. Dis. kand. teh. nauk. Tjumen', 2008, 23 p.
  7. Ramazanov R.A. *Izuchenie i prognozirovaniye izmeneniya kollektorskiykh svoystv gornyykh porod v processe razrabotki po kompleksu GIS i kernovykh issledovaniy*. [Study and forecasting of changes in properties of reservoir rocks in the process of development of a complex of GIS and core research]. Diss. na soisk. uch. stepeni doktora filosofii. Baku. Fond Instituta Geologii, 2010, 200 p.
  8. *Rock engineering problems related to underground hydrocarbon storage*. Lu, Ming. Journal of RockMechanics and Geotechnical Engineering, 2010, no. 2(4), pp. 289-297.
  9. Feyzullayev A.A., Veliyeva E.B., Ramazanov R.A., Ismajlova G.G.. *Ob izmenenii petrofizicheskikh svoystv porod v svyazi s padeniem davleniya v dlitel'no razrabatyvaemykh neftegazovykh mestorozhdeniyah*. [About change of petrophysical properties of rocks in connection with pressure drop in long developed petroleum fields]. Novosti geofiziki v Azerbajdzhanе, 2013, no. 3, pp. 3-14.
  10. Al-Awad M.N.J. *Relationship Between reservoir productivity and pore pressure drop*. Journal of King Saud University. Engineering Sciences, 2001, no. 13(1), pp. 137-152.
  11. Cheremisin N.A., Sonich V.P., Efimov P.A. *Rol' neuprugoy deformatsii kollektorov v nefteotdache plastov*. [Role of inelastic deformation of reservoirs in oil recovery of reservoirs]. Neftjanoe Hozjajstvo, Oil economy, 2001, no. 9, pp. 76-79.
  12. Katz D.L. and Tek M.R. *Overview on underground storage of natural gas*. Journal of Petroleum Technology, 1981, no. 33, pp. 943-951.
  13. Bary, A., Crotogino, F., Prevedel B., Berger H., Brown K., Frantz J., & Ren N. *Storing natural gas underground*. Oilfield Review, 2002, no. 14(2). pp. 2-17.
  14. Evans, D.J. *An appraisal of underground gas storage technologies and incidents, for the development of risk assessment methodology*. British Geological Survey Internal Report, 2007.
  15. *Underground gas storage in the world - 2013. EXECUTIVE SUMMARY*. Available at: <http://www.enerdata.net/>.
  16. Karger M.D., Fidens S.A., Berman L.B., Nejman V.S., Trofimov D.M., Zaharov A.I., Vol'pin S.G. *Okonchatel'nyy otchet po Proektu. Postroeniye blochnoy fil'tracionnoy modeli podzemnogo gazohranilishha Karadag i rekomendatsii po sisteme zakachki i otbora gaza* [Final report on the Project. Construction of a block filtration model of the Karadag underground gas storage and recommendations for a gas injection and extraction system]. Baku, 2013, 103 p.
  17. Feyzullayev A.A., Veliyeva E.B., Gasanov A.Z. *Osobennosti izmeneniya plastovykh davleniy v dlitel'no-razrabatyvaemykh mestorozhdeniyah Absheron'skogo poluostrova (na primere mestorozhdeniya Gala)*. [Features of changes in reservoir pressures in the long-developed deposits of the Absheron Peninsula (on the example of the Gala deposit)]. News of ANAS, Earth Sciences, Izvestiya NANA, Nauki o Zemle, 2012, no. 4, pp. 3-12.
  18. Kharroubi A., Layan B., Cordelier P. *Influence of pore pressure decline on*





- the permeability of North Sea sandstones. [International Symposium of the Society of Core Analysts], Abu Dhabi. UAE, 2004, 5-9 October.*
19. Peng S., Z. Meng, H. Wang, C. Ma, and J. Pan. Testing study on pore ratio and permeability of sandstone under different confining pressures. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, no. 22(5), pp. 742–746
  20. Huang Y. and E. Wang. Experimental study of the laws between the effective confining pressure and rock permeability, *Journal of Tsinghua University*, 2007, no. 47(3), 340–343
  21. Chan A.W. and Zoback M.D. *The Role of Hydrocarbon Production on Land Subsidence and Fault Reactivation in the Louisiana Coastal Zone*. *Journal of Coastal Research*, 2007, no. 23(3), pp. 771-786.
  22. Liu J.-J., Feng X.-T, Jing L.-R. *Theoretical and experimental studies on the fluid-solid coupling processes for oil recovery from low permeability fractured reservoirs*. *Int. J Rock Mech. Min.* 2004, Sci, 41(3).
  23. Kol'chickaya T.N., Mihaylov N.N. Povedenie glinistyh porod pri ciklicheskikh nagruzkah. [*Behavior of clay rocks under cyclic loads*] *Oil and gas geology, Geologija nefi i gaza*, 2000, 2, pp. 52-55.
  24. Jakovleva N.V. Sovershenstvovanie metodov monitoringa parametrov podzemnyh hranilish gaza s cel'yu predotvrashheniya oslozheniy pri ekspluatatsii. [*Improvement of methods for monitoring the parameters of underground gas storage facilities in order to prevent complications during operation*]. Avtoref. diss. na soisk. uch. stepeni kand. tehn. nauk. Moscow, 2005.
  25. Kalinichenko I.V. Eksperimental'noe modelirovanie izmeneniya deformacionnyh i emkostnyh svoystv poristyh kollektorov v svyazi s ekspluatatsiey podzemnyh hranilish gaza. [*Improvement of methods for monitoring the parameters of underground gas storage facilities in order to prevent complications during operation*]. Abstract, Avtoreferat, disser. kand. geol.-miner. nauk: Mosk. gos. un-t im. M.V. Lomonosova. Moscow, 2009, 208 p.
  26. Zubarev S.A. Razvitie tehnologiy monitoringa za obyektom podzemnogo hranenisha gaza (Na primere Central'nogo PHG). [*Development of monitoring technologies for the underground gas storage facility (based on the Central UGS facility)*]. Avtoref. diss. na soisk. uch. st. k.t.n. Uhta, 2010.
  27. Evik V.N. Varjagov S.A., Pavljukova I.V., Smirnov Ju.Ju. Monitoring geologicheskoy sredy pri ekspluatatsii Shelkovskogo podzemnogo hranilisha gaza. [*Monitoring of the geological environment during the operation of the Shchelkovo underground gas storage*]. Available at: <https://neftegaz.ru/science/view/393-Monitoring-geologicheskoy-sredy-pri-ekspluatatsii-Schelkovskogo-podzemnogo-hranilisha-gaza>.
  28. Jakovleva N.V., Lur'e M.V., Didkovskaya A.S. Uvelichenie doli bufnogo gaza v PHG kak effektivnoe sredstvo predotvrashheniya razrusheniya porovogo kollektora [*Increase of the proportion of buffer gas in UGS as an effective means of preventing the destruction of the pore collector*]. *Quality management in the oil and gas sector, Upravlenie kachestvom v neftegazovom komplekse*, 2004, no. 3/4, pp. 65-67.
  29. Semenov E.O., Ryzhov A.E., Zhukov B.C., Iselidze O.V. Izmenenie pronikaemosti kollektorov pri ciklicheskih izmeneniyah effektivnogo davleniya. [*Change in the permeability of reservoirs during cyclic changes in effective pressure*]. *Materials of the II International Conference "PHG: nadezhnost' i jeffektivnost"* [*Materials of the II International Conference "UGS: Reliability and Efficiency"*]. Moscow, VNIIGAZ, 2008, pp. 76-77.
  30. Semenov E.O. Osobennosti formirovaniya i ocenka kollektorskih i ekraniruyushih svoystv terrigennyh porod pri sozdanii podzemnyh hranilish gaza v vodonosnyh plastah. [*Features of the formation and assessment of reservoir and shielding properties of terrigenous rocks in the creation of underground gas storage facilities in aquifers*]. Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Moscow, 2010.
  31. Golodkovskaya G.A., Kalinichenko I.V. Izmenenie poristosti peschanyh





porod-kollektorov v svyazi s ciklicheskoj ekspluatatsii podzemnyh hranilish gaza (PHG). [*Change in the porosity of sandy reservoir rocks in connection with the cyclic operation of underground gas storages (UGS)*]. Materials of the VIII International Conference "New Ideas in the Sciences of the Earth" Materialy VIII Mezhdunarodnoy konferencii "Novye idei v naukah o zemle" (10-13 aprelya 2007g., RGGRU), Doklady. Tom 8. Moscow, RGGRU, 2007, pp. 115-118.

32. Imanov A.A. Fiziko-mehanicheskie svoystva osadochnykh porod Juzhno-Kaspiyskogo basseyna v glubinnnykh usloviyakh: uglevodorodnye resursy bol'shih glubin. [*Physical and mechanical properties of sedimentary rocks of the South Caspian basin under deep conditions: hydrocarbon resources of great depths*]. Baku. Nafta-Press, 2012, 203 p.

33. Lebedev M.S. Sovershenstvovanie metodiki ocenki emkostno-fil'tracionnykh svoystv kollektorov podzemnykh hranilish gaza: na primere Severo-Stavropol'skogo podzemnogo hranilisha gaza. [*Improvement of the methodology for assessing the capacitance-filtration properties of reservoirs of underground gas storage facilities: the example of the North Stavropol underground gas storage*]. Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Stavropol', 2006.

34. Zhukov. V.S. Vozdeystvie sovremennykh geodinamicheskikh processov na fil'tracionno-emkostnye svoystva kollektorov PHG. [*Influence of modern geodynamic processes on the filtration-capacitive properties of UGS reservoirs*]. International conference "Modern geodynamics of subsurface resources and ecological and industrial safety of oil and gas facilities Mezhdunarodnaya konferenciya «Sovremennaja geodinamika neдр i ekologo-promyshlennaya bezopasnost' obyektov neftegazovogo kompleksa». Moscow, IPNG RAN, 7–9 dekabrya 2009.

35. Grigoryev B.V., Shubin A.A. Vliyanie izmeneniya effektivnogo davleniya na fil'tracionno-emkostnye svoystva porod-kollektorov. [*Effect of the change in effective pressure on the filtration-capacitive properties of reservoir rocks*] Bulletin of the Tyumen State University. Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika, 2015, Tom 1, no. 2(2), pp. 15-21.